

부임피던스 변환회로를 이용한 두께 모드 압전 진동자의 특성제어

Characteristics Control of a Thickness Mode Piezoelectric Vibrator Using a Negative Impedance Converter Circuit

황 성 필*, 김 무 준**, 하 강 열**
(Sung-Phil Hwang*, Moo-Joon Kim**, Kang-Lyeol Ha**)

*부경대학교 대학원 음향진동공학과, **부경대학교 물리학과
(접수일자: 2002년 8월 22일; 채택일자: 2002년 9월 23일)

본 연구에서는 두께 모드 압전 진동자의 특성제어 부임피던스 변환 (NIC) 회로를 적용하였다. 두 개의 두께 모드 압전 진동자를 적층한 후, NIC 회로를 적용하여 입력 어드미턴스와 전기기계 변환효율을 측정하고 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그 결과 NIC 회로에서 구현되는 부저항의 값에 따라 압전 진동자의 품질계수 및 전기음향 변환효율이 제어되었으며 NIC 회로를 적용한 경우에 품질계수는 약 20배, 전기음향 변환효율은 약 2.5배 정도 향상됨을 확인하였다.

핵심용어: 두께 모드 압전 진동자, 부임피던스 변환 (NIC) 회로, 품질계수

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.1)

In this paper, a Negative Impedance Converter (NIC) circuit was employed for the electro-mechanical characteristic control of a thickness mode piezoelectric vibrator. Two circular plane piezoelectric vibrators were bonded together and the NIC circuit was connected to one of the vibrators. The theoretical and experimental analysis of the characteristics shown that the quality factor and the electro-acoustic efficiency of the vibrator with the NIC circuit could be improved by 20 times and 2.5 times, respectively.

Keywords: Thickness mode piezoelectric vibrator, Negative impedance converter circuit, Quality factor

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.1)

I. 서론

압전 진동자의 특성개선을 위한 많은 연구들이 진행 중에 있으나, 새로운 압전재료의 개발이 주류를 이루고 있다[1]. 이러한 연구들과는 달리 Tomikawa 등에 의해 연상증폭기 (OP-Amp)를 이용한 부임피던스 변환 (NIC: Negative Impedance Converter) 회로를 전극 분할된 횡모드 압전 진동자에 적용하여 압전 진동자의 품질계수를 향상시킨 바 있으며, 이러한 특성개선 방법을 굴곡 모드 진동자에 적용하여 공기 중에서 수신

감도를 개선시킨 연구가 발표된 바 있다[2,3]. 하지만 수 중에서 횡모드 및 굴곡모드 압전 진동자를 사용하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 NIC 회로를 이용한 특성개선 방법을 두께 모드 압전 진동자에 적용하여 그 가능성을 확인해 보았다.

II. 이론

그림 1과 같이 두 개의 두께 모드 압전 진동자를 분극방향

책임저자: 황성필 (sweetheart94@hanmail.net)
60E-737 부산광역시 남구 대연 3동 599-1번지
부경대학교 물리학과
(전화: 051-620-6349; 팩스: 051-611-6357)

1-1'은 구동용 압전층의 입력단을 나타내고 있으며, 2-2'은 연산증폭기를 이용한 NIC 회로가 연결되는 제어용 압전층의 전기단을 나타내고 있다.

그림 1의 압전 진동자를 전송선로형 등가회로로 나타내면 그림 2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 단, $Cd1$ 및 $Cd2$ 는 각 압전 진동자의 제동용량을 나타내고 있으며, Lo 와 Lo' 은 각 압전 진동자의 음의 제동용량(negative capacitance)을 대신하여 등가 인덕턴스로 나타낸 것이다[4]. 그림 2(a)에서 임피던스 파라메타(Z_1, Z_2, Z_1', Z_2')를 정리하면 그림 2(b)와 같이 나타낼 수 있으며, 트랜스포머를 소거하고 NIC 회로를 접속하면 그림 2(c)와 같이 나타낼 수 있다.

압전 진동자에 연결된 NIC 회로의 입력 어드미턴스는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 저항 R_0 과 R_0' 의 값을 같게 하면, NIC 회로의 입력 어드미턴스는 $-(j\omega C_s + 1/R_s)$ 으로 나타낼 수 있다. 이 음의 소자(negative element)들을 등가소자로 표현하면, 그림 2(c)

의 점선부분에서 나타낸 것과 같이 $-Cs$ 와 $-R_s$ 가 압전 진동자에 병렬로 연결된 형태가 된다.

$$Y_{IN} = -\frac{R_1}{R_2} \left\{ j\omega C_s + \frac{1}{R_s} \right\} \quad (1)$$

그림 2(c)에서 NIC 회로의 C_s 값을 $Cd2$ 와 동일한 값으로 하면, $-Cs$ 는 압전 진동자의 제동용량 $Cd2$ 를 소거하게 되므로 그림 2(d)와 같이 나타낼 수 있고, 압전 진동자의 품질계수는 식 (2)로 주어진다. 따라서 압전 진동자의 품질계수 Q 는 NIC 회로의 저항 R_s 의 값에 의해 결정되며, R_s 가 등가저항 R 에 근사한 값을 가질 때 품질계수는 최대가 된다.

$$Q = \frac{\omega L}{R - R_s} \quad (2)$$

또한 NIC 회로가 적용된 압전 진동자의 특성개선을 확인하기 위해서 전기음향 변환효율을 구하면 식 (3)과 같

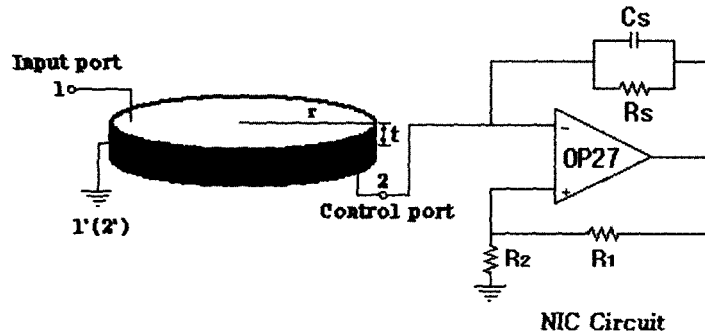


그림 1. NIC 회로가 적용된 두께 모드 압전 진동자
Fig. 1. Thickness mode piezoelectric vibrator with the NIC circuit.

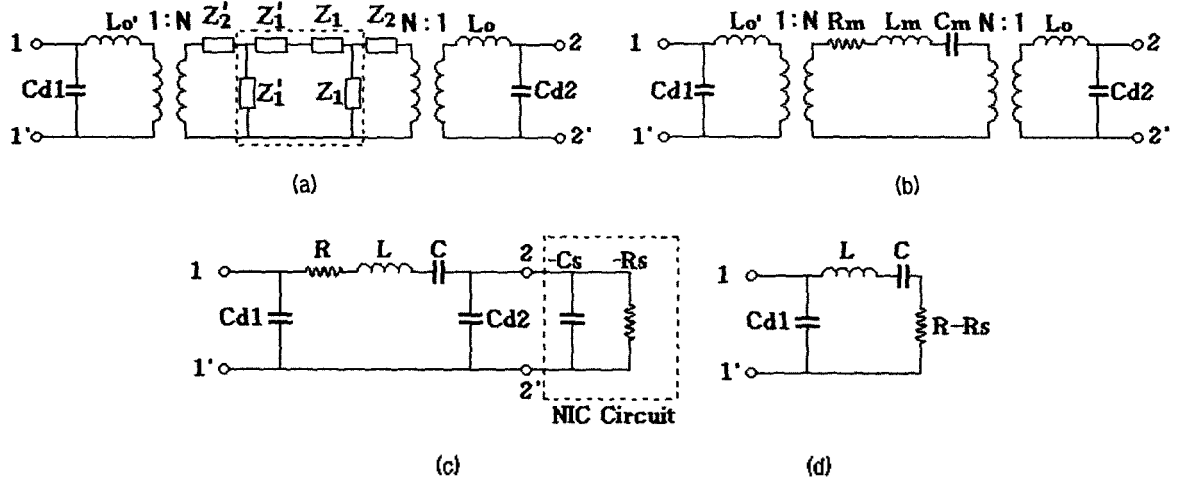


그림 2. NIC 회로가 적용된 압전 진동자의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of piezoelectric vibrator with the NIC circuit.

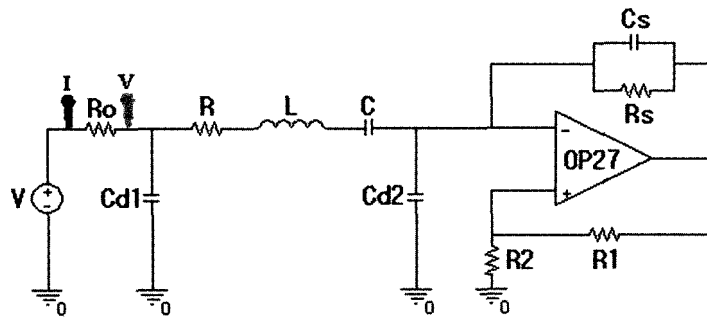


그림 3. NIC 회로가 적용된 압전 진동자의 PSpice 모델
Fig. 3. PSpice model of piezoelectric vibrator with the NIC circuit

다 5]. 여기서 G_{fo} , Y_{m0} , Y_{m00} 는 각각 수중에서 압전 진동자의 입력 컨덕턴스와 어드미턴스 그리고 공기 중에서의 입력 어드미턴스를 나타내고 있다.

$$\eta_{ia} = \frac{|Y_{m0}|}{G_{fo}} \left(1 - \frac{|Y_{m00}|}{|Y_{m0}|} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

III. 시뮬레이션 및 실험방법

그림 3은 NIC 회로가 연결된 두께 모드 압전 진동자의 PSpice 모델[6,7]이며, 저항 R_s 는 계측기의 내부저항을 고려한 것이다. 시뮬레이션 방법은 1 [V_{pp}]의 교류전원을 구동전압으로 인가하고 주파수를 327~339 [kHz]까지 변화시키면서 NIC 회로의 저항 R_s 의 변화에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 저항 R_0 에 걸리는 전압과 전류의 비로 시뮬레이션 하였다. 단 NIC 회로의 C_s 값은 압전 진동자의 제동용량 $Cd2$ 와 동일하다.

그림 4는 NIC 회로가 연결된 두께 모드 압전 진동자의

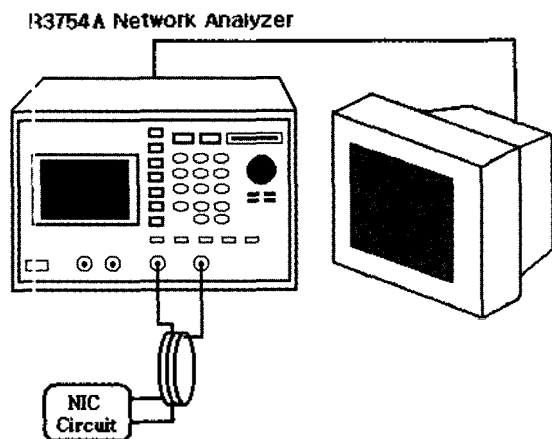


그림 4. 입력 어드미턴스 측정 장치도
Fig. 4. Schematics of input admittance measurement.

전기적 특성을 측정하기 위한 장치도로서 NIC 회로의 저항 R_s 의 변화에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 입력단에 연결된 네트워크 분석기 (R3754A)로 측정하였다. 아래의 표 1은 시뮬레이션 및 실험에서 사용된 압전 진동자의 상수값을 나타내고 있으며, 등가 R , L , C 는 적층된 압전 진동자의 상수값이다.

표 1. 압전 진동자의 등가회로 상수

Table 1. Constants of the equivalent circuit of the piezoelectric vibrator.

Items	Values
Radius r	25.0 [mm]
Thickness t	3.05 [mm]
Density ρ	7975 [kg/m ³]
Center frequency f_0	332 [kHz]
Equivalent resistance R	32.5 [Ω]
Equivalent capacitance L	58.9 [pF]
Equivalent inductance C	3.85 [mH]
Clamped capacitance $Cd1$	6.0 [nF]
Clamped capacitance $Cd2$	6.01 [nF]
Resistance R_1 , R_2	13 [k Ω]
Internal resistance R_0	50 [Ω]
Capacitance C_s	6.01 [nF]

IV. 시뮬레이션 및 실험결과

NIC 회로의 저항 R_s 의 변화에 따른 두께 모드 압전 진동자의 입력 어드미턴스의 시뮬레이션 및 실험결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 여기서 'normal'이란 NIC 회로를 연결하지 않고 압전 진동자만을 구동시켰을 때의 입력 어드미턴스를 나타내고 있다.

그림 5의 시뮬레이션결과 NIC 회로의 저항 R_s 가 증가함에 따라 어드미턴스 로커스가 증가하는 경향을 나타내

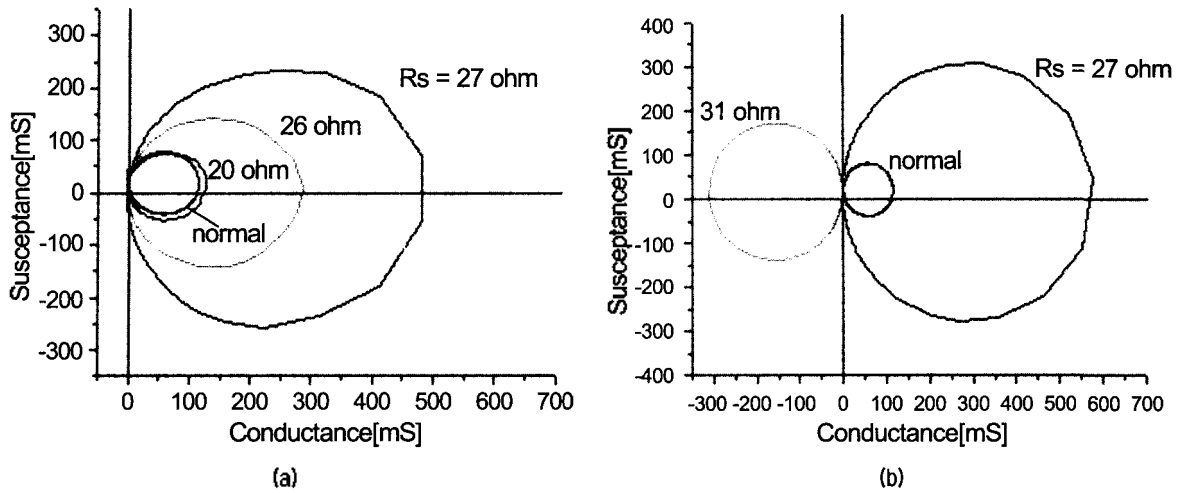


그림 5. 저항 R_s 의 변화에 따른 입력 어드미턴스 시뮬레이션 결과 (공기중)
 Fig. 5. Simulation results of input admittance for various value of R_s (in Air).

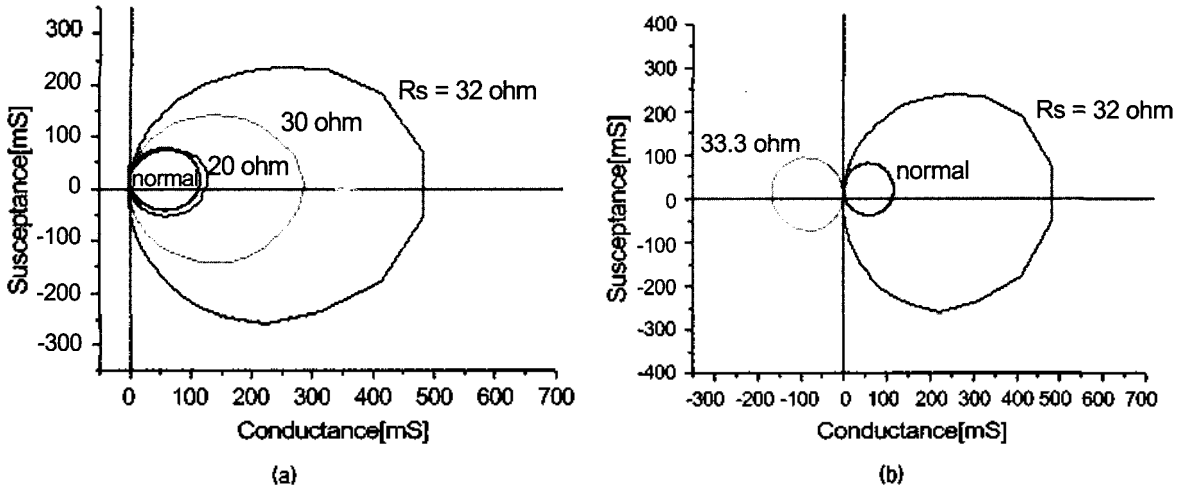


그림 6. 저항 R_s 의 변화에 따른 입력 어드미턴스 측정결과 (공기중)
 Fig. 6. Measurement results of input admittance for various value of R_s (in Air).

며, R_s 가 27 [Ω]일 때 어드미턴스 로커스는 최대가 되었다. 즉, 식 (2)에 나타난 것처럼 압전 진동자의 등가저항 성분 R 이 NIC 회로의 음의 소자 (negative element)인 저항 R_s 에 의해 감소되어 품질계수가 증가함을 의미한다. 그리고 저항 R_s 가 31 [Ω]일 때, 어드미턴스 로커스의 컨덕턴스 성분이 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 NIC 회로의 부임피던스가 압전 진동자의 등가임피던스보다 큰 값을 가지게 되어 전체 임피던스가 음의 값을 가지게 되기 때문이다.

그림 6은 NIC 회로를 적용한 두께 모드 압전 진동자의 전기적 특성을 측정하는 결과를 나타내고 있다. 그림 6의 실험결과 NIC 회로의 저항 R_s 가 32 [Ω]일 때, 압전 진동자의 어드미턴스 로커스는 최대로 나타났으며, 저항 R_s

가 33.3 [Ω]일 때, 어드미턴스 로커스의 컨덕턴스 성분이 음의 값을 가짐을 알 수 있다.

이상의 그림 5와 그림 6의 시뮬레이션 및 실험결과로부터 NIC 회로의 음의 소자에 대한 압전 진동자의 어드미턴스 로커스의 변화 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 실험과 시뮬레이션 결과가 차이를 보이는 것은 실제 압전 진동자와 이론적으로 계산된 압전 진동자의 상수값에서 발생하는 오차와 시뮬레이션시 고려하지 않은 접착층에 의한 것이라 생각된다.

표 2는 NIC 회로의 적용 유무에 따른 압전 진동자의 품질계수를 나타낸 것이다. 계산결과 NIC 회로가 적용된 경우는 그렇지 않은 경우보다 약 20배 정도 품질계수가 향상됨을 알 수 있다.

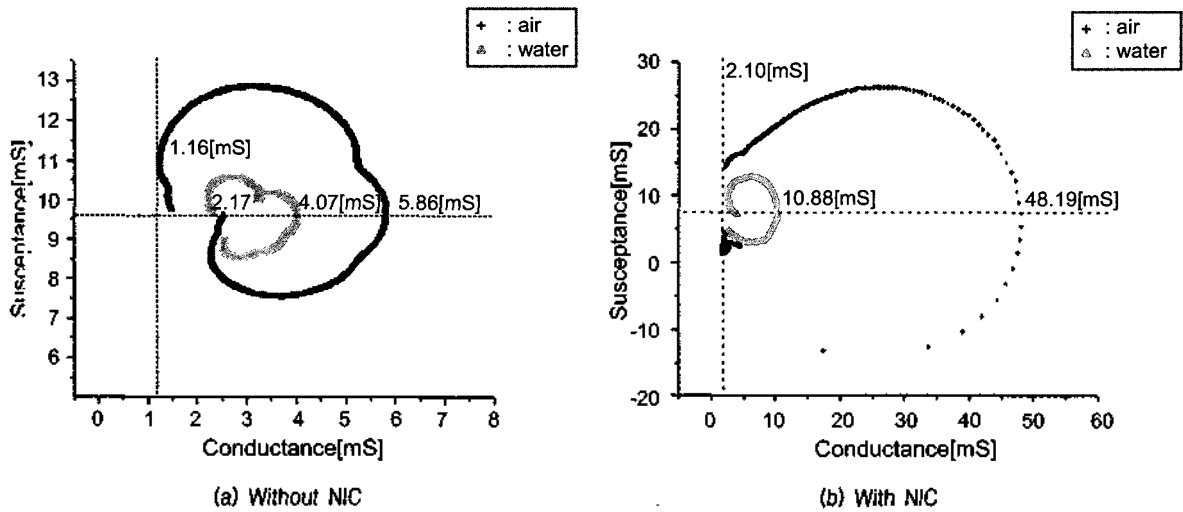


그림 7. 음향 매질에서의 어드미턴스 로커스의 변화
 Fig. 7. Variations of admittance loci about acoustic medium.

표 2. 품질계수의 비교

Table 2. Comparison of the quality factor.

	Origin value (without NIC)	Maximum value (with NIC)
Quality factor	246	4672

그림 7은 음향매질에서 측정된 두께 모드 압전 진동자의 어드미턴스 로커스를 나타낸 것이며, 식 (3)을 이용하여 전기음향 변환효율을 구하면, NIC 회로를 적용한 경우가 65.3 [%], 적용하지 않은 경우가 27.8 [%]로 나타났다.

V. 결론

본 연구에서는 NIC 회로를 두께 모드 압전 진동자에 적용하여 그 특성제어 가능성을 확인해 보았다. 시뮬레이션 및 실험결과로부터 NIC 회로의 저항 R_s 가 변화함에 따라 압전 진동자의 등가저항 R 에 영향을 주어 품질계수가 변화됨을 알 수 있었으며, 또한 전기음향 변환효율도 변화시켰다. 그리고 압전 진동자에 NIC 회로를 적용한 경우는 적용하지 않은 경우보다 품질계수는 20배 정도, 전기음향 변환효율은 2.5배 정도 향상됨을 확인할 수 있었다. 이상의 결과들로부터 NIC 회로를 적용한 두께 모드 압전 진동자의 특성 제어 가능성을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. J.-H. Yoo, H.-S. Yoon, K.-H. Yoon, Y.-H. Jeong, and C.-Y. Park, "Piezoelectric characteristics of PMN-PZT ceramics for piezoelectric transformer," *Ultrasonics Symposium, Proceedings, IEEE*, 1, 981-984, 1998.
2. H. Tamura, Y. Tomikawa, C. Kusakabe, K. Sakurai, and K. Ohnishi, "Basic investigation on achieving high resonance quality factor of piezoelectric vibrator," *Jpn. J. Phys.* 36, 3030-3033, 1997.
3. Y.-I. Ko, M.-J. Kim, and K.-L. Ha, "A Study for Characteristics Control of Piezoelectric Transducer and Sensitivity Improvement of Flexural-Type Ultrasonic Sensor," *Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration Engineering, Graduate School, Pukyong National University*, 31-46, 2002.
4. C. Y. Lin, *Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converters, Ph.D. Dissertation, depau of in Electrical Engineering, VPI*, 160-171, 1997.
5. 超音波工学, 株式会社 コロナ 社, 日本電子機械工業會 編, 55-58, 1993.
6. E. Maione, P. Tortoli, G. Lypaciewicz, and A. Nowicki "PSPice modelling of ultrasound transducers: Comparison of software models to experiment," *Ultrason., Ferroelect., and Freq. Contr., IEEE Transactions on*, 46, Issue 2, 399-406, 1999.
7. W. M. Leach, Jr., "Controlled-source analogue circuits and PSPice models for piezoelectric transducers," *IEEE Tras., Ultrason., Ferroelect., Freq., Contr.*, 41 (1), 60-66, 1994.

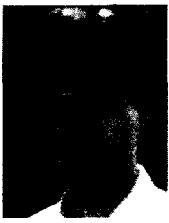
저자 약력

● 황 성 필 (Sung-Phil Hwang)



2001년: 부경대학교 물리학과 졸업 (이학사)
2001년~현재: 동 대학원 음향진동공학과 석사과정
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 특성제어 및 성능개선

● 김 무 준 (Moo-Joon Kim)



1985년: 부경대학교 (구 부산수산대학) 응용물리학과 졸업 (이학사)
1990년: 부경대학교 대학원 응용물리학과 졸업 (이학석사)
1994년: 일본 도호쿠 (東北)대학 대학원 공학연구과 수료 (공학박사)
1994년~현재: 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수
※ 주관심분야: 압전 진동자의 특성해석 및 초음파 트랜스듀서의 설계·제작

● 하 강 열 (Kang-Lyeol Ha)

1978년: 부경대학교 (구 부산수산대학) 어업학과 졸업 (수산학사)
1982년: 부경대학교 대학원 수산 물리학과 졸업 (수산학석사)
1990년: 일본 도호쿠 (東北)대학 대학원 공학연구과 수료 (공학박사)
1991년~현재: 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 제작 및 응용, 초음파 음장 측정 및 해석